

## ПРИБЛИЖЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА РАССЕЯНИЯ МАГНИТНОГО ПОТОКА ПОЛЮСОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТА БЕТАТРОНА

М. Ф. ФИЛИППОВ

(Представлено научным семинаром физико-технического факультета)

При расчете магнитной цепи электромагнита бетатрона, синхротрона, циклотрона и т. п. для правильного определения размеров магнитопровода и ампервитков намагничивающей обмотки необходимо учитывать коэффициент рассеяния магнитного потока полюсов (рис. 1)

$$\sigma_n = \frac{\Phi_n}{\Phi_H} = \frac{\Phi_H + \Phi_p}{\Phi_H} = 1 + \frac{\Phi_p}{\Phi_H}, \quad (1)$$

где  $\Phi_H$  — магнитный поток в средней плоскости междуполюсного пространства в круге с радиусом  $r_H$ ,

$r_H$  — наружный радиус полюсных наконечников,

$\Phi_n$  — магнитный поток в полюсных сердечниках на стыке их с ярмом,

$\Phi_p$  — магнитный поток рассеяния полюсов.

Коэффициент рассеяния потока полюсов в зависимости от формы и размеров междуполюсного пространства изменяется в довольно широких пределах и весьма существенно влияет на результаты расчета магнитной цепи.

Определение коэффициента  $\sigma_n$  аналитическими или графическими методами возможно, когда уже известны размеры магнитопровода и полные ампервитки намагничивающей обмотки, т. е. только после расчета магнитной цепи. Чтобы правильно рассчитать размеры магнитопровода и намагничивающие ампервитки, приходится коэффициент  $\sigma_n$  в первом варианте расчета принимать ориентировочно, уточняя его значение в последующем. Графические методы расчета коэффициента рассеяния довольно сложны и трудоемки. Поэтому, чем ближе к истинному принятое ориентировочно значение коэффициента рассеяния, тем меньше времени потребуется на выполнение расчета магнитной цепи.

Учитывая, что геометрически подобные электромагниты разных размеров будут иметь одинаковый коэффициент рассеяния, можно, используя данные измерений коэффициента  $\sigma_n$  выполненных электромагнитов, найти довольно простое и практически достаточно точное уравнение для определения этого коэффициента.

Как известно, в электромагнитах циркулярных ускорителей является неизбежным наличие большого воздушного зазора между полюсными на-

конечниками, занимаемого ускорительной камерой. В этом случае магнитное сопротивление стали магнитопровода весьма мало по сравнению с магнитным сопротивлением воздушного зазора, и поверхность полюсных наконечников можно считать эквипотенциальной поверхностью магнитного поля междуполюсного пространства (рис. 1). Для ампервитков, преодолевающих магнитное сопротивление междуполюсного пространства, можно написать равенство

$$AW_{\delta} = 0,8 B_0 \delta_0 = 0,8 B_p \lambda_p, \quad (2)$$

где

- $B_0$  — магнитная индукция в междуполюсном пространстве на радиусе равновесной орбиты  $r_0$ ,
- $\delta_0$  — воздушный зазор на радиусе  $r_0$ ,
- $B_p$  и  $\lambda_p$  — средняя расчетная индукция и расчетная длина средней силовой линии потока рассеяния полюсов.

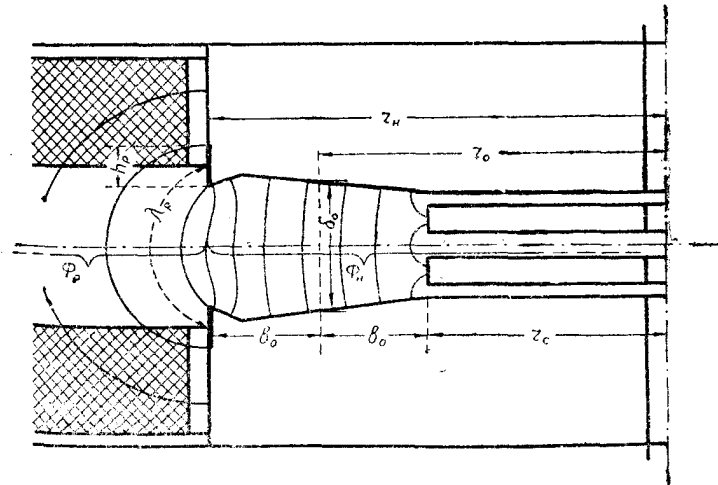


Рис. 1

Из уравнения (2) имеем:

$$B_p = \frac{\delta_0}{\lambda_p} B_0 = k_p B_0. \quad (3)$$

Известно, что поток рассеяния полюсов  $\Phi_p$  сосредоточен в основном на боковой поверхности полюсов вблизи воздушного зазора.

Для упрощения полагаем, что поток рассеяния равномерно распределен по высоте  $h_p = \delta_0$  на боковой поверхности полюсов (рис. 1).

В этом случае магнитный поток рассеяния

$$\Phi_p = 2 \pi r_n h_p B_p = 2 \pi r_n \delta_0 k_p B_0. \quad (4)$$

Магнитный поток в средней плоскости междуполюсного пространства в круге с радиусом  $r_n$  при соблюдении бетатронного отношения ( $B_R : B_0 = 2$ ) [1] равен

$$\Phi_n = 2 \pi r_0^2 B_0 + \frac{2 \pi r_0^n B_0}{2-n} (r_n^{2-n} - r_0^{2-n}),$$

где  $n$  — показатель спадания поля по радиусу,

$B_k$  — средняя индукция в круге с радиусом  $r_0$ .

Без ущерба для точности расчетов можно принять  $n = 1$ , тогда

$$\Phi_n \approx 2 \pi r_0 r_n B_0. \quad (5)$$

Подставив значение  $\Phi_p$  и  $\Phi_H$  из уравнений (4 и 5) в уравнение (1), получим

$$\sigma_n = 1 + k_p \frac{\delta_0}{r_0} \quad (6)$$

Уравнение (6) относится к простейшей конструкции электромагнита бетатрона, когда управляющее и ускоряющее магнитные поля создаются общими полюсными сердечниками (рис. 1). Если полюса электромагнита имеют кольцевые пазы для размещения компенсирующих обмоток (рис. 2а, б), то кроме общего коэффициента рассеяния магнитного потока полюсов  $\sigma_n$ , вычисляемого по уравнению (6), необходимо знать коэффициент рассеяния управляющего кольцевого полюса  $\sigma_y$ .

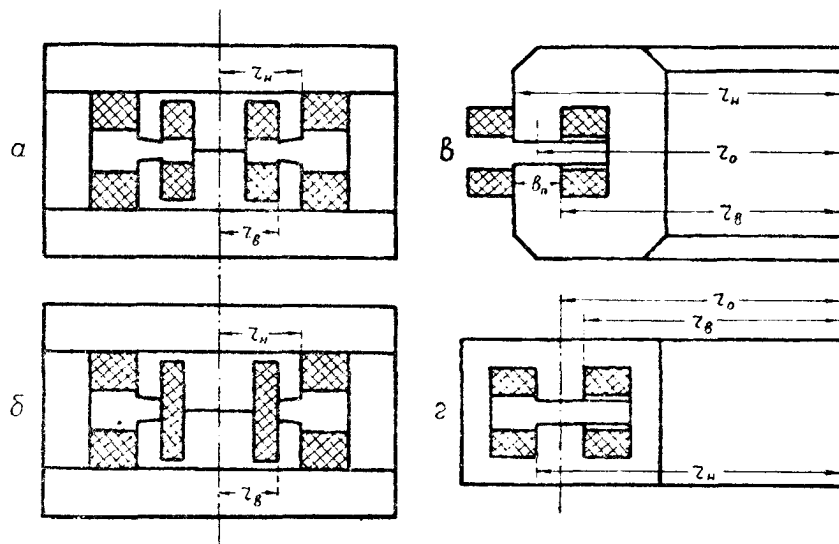


Рис. 2

Коэффициент рассеяния управляющего кольцевого полюса, учитывающий поток рассеяния только с наружной стороны,

$$\sigma_{yH} = \frac{\Phi_{H\delta} + \Phi_p}{\Phi_{H\delta}} = 1 + \frac{\Phi_p}{\Phi_{H\delta}}, \quad (7)$$

где  $\Phi_{H\delta}$  — магнитный поток в кольце, ограниченном радиусами  $r_H$  и  $r_\delta$  в средней плоскости между полюсами (рис. 2а, б)

$$\Phi_{H\delta} = \frac{2\pi B_0 r_0^n}{2-n} (r_H^{2-n} - r_\delta^{2-n}) \cong 2\pi B_0 r_0 (r_H - r_\delta).$$

Подставив полученное значение  $\Phi_{H\delta}$  и значение  $\Phi_p$  из уравнения (4) в уравнение (7), найдем

$$\sigma_{yH} = 1 + k_p \frac{r_H \delta_0}{r_0 (r_H - r_\delta)}. \quad (8)$$

В уравнении (8) учитывается рассеяние потока полюсов только с наружной стороны управляющего полюса, когда на внутренней стороне пазовая обмотка закрывает воздушный зазор (рис. 2б).

Если воздушный зазор на внутренней стороне управляющего полюса открыт (рис. 2а), то коэффициент рассеяния управляющего полюса будет равен

$$\sigma_y = 1 + (k_p \cdot r_H + k_p^1 r_\delta) \frac{\delta_0}{r_0 (r_H - r_\delta)}. \quad (9)$$

Коэффициент  $k_p^1$ , учитывающий поток рассеяния с внутренней стороны управляющего полюса, несколько отличается от коэффициента  $k_p$ , учитывающего рассеяние с наружной стороны. Но если пренебречь разницей между  $k_p$  и  $k_p^1$ , приняв  $k_p^1 = k_p$ , и полагая  $(r_n + r_\delta) = 2r_0$ , найдем менее точное, но более простое уравнение для определения полного коэффициента рассеяния потока управляющих полюсов бетатрона с кольцевыми пазами на полюсах

$$\sigma_y = 2k_p \frac{\delta_0}{b_y}, \quad (10)$$

где  $b_y$  — ширина кольца управляющего полюса.

В синхротроне, где центральный сердечник магнитопровода отсутствует, электромагнит имеет вид кольца с С-образным или Ш-образным поперечным сечением магнитопровода (рис. 2 в, г).

При С-образном магнитопроводе коэффициент рассеяния потока полюсов вычисляется по уравнению (9 или 10); при Ш-образном магнитопроводе — по уравнению (10).

Магнитный поток в междуполюсном пространстве циклотрона при радиусе полюсных наконечников  $r_n$

$$\Phi_{nc} \cong \pi r_n^2 \cdot B \delta.$$

Пользуясь уравнениями (1) и (4), найдем для циклотрона

$$\sigma_n = 1 + \frac{\Phi_p}{\Phi_{nc}} = 1 + 2k_p \frac{\delta}{r_n}. \quad (11)$$

Определение коэффициента рассеяния потока полюсов электромагнита по приведенным выше уравнениям не составит затруднений, если известно значение коэффициента  $k_p$ , так как в процессе расчета электромагнита к моменту, когда возникает потребность определить  $\sigma_n$ , все необходимые размеры междуполюсного пространства уже известны.

Коэффициент  $k_p$  для геометрических подобных электромагнитов любых размеров величина постоянная, если магнитная индукция в стали магнитопровода имеет значение, при котором еще не сказывается ощутительно явление насыщения. В рассматриваемых электромагнитах, вследствие наличия большого воздушного зазора, насыщение в обычных условиях незначительно влияет на величину  $k_p$ .

Измерения коэффициентов рассеяния потока в различных по размерам и конструкции электромагнитах показали, что отклонение от подобия в пределах, имеющих место в обычных конструкциях одинакового типа, практически не сказывается на величине коэффициента  $k_p$ .

Таким образом, коэффициент  $k_p$  можно определить экспериментально на электромагните любых размеров по типу, близкому к проектируемому.

В отдельных случаях, главным образом, в больших синхротронах и синхрофазотронах, при определении коэффициента рассеяния потока полюсов требуется особо высокая точность. Наиболее точные результаты можно получить, измеряя коэффициент рассеяния на уменьшенной модели проектируемого электромагнита, но изготовление модели связано со значительной затратой средств и времени.

С достаточной точностью коэффициент  $k_p$ , а следовательно, и коэффициент рассеяния потока можно определить с помощью небольшой плоской модели. Плоская модель представляет электромагнит с С-образным магнитопроводом из пластин листовой трансформаторной стали. Полюсные наконечники модели съемные, что позволяет подобрать на одном и том же электромагните любое заданное отношение  $\frac{\delta}{b}$  (рис. 3) и исследовать полюса различных профилей.

Для определения  $\kappa_p$  необходимо иметь кривую распределения магнитной индукции вдоль средней линии между полюсным пространством, т. е. кривую  $B = f(b)$ .

Как указывалось выше, поток рассеяния полюсов можно считать сосредоточенным на высоте  $h_p = \delta$  боковой поверхности полюсов (рис. 1). В этом случае расчетный поток рассеяния на погонный сантиметр ширины боковой поверхности полюса модели с наружной стороны (рис. 3).

$$F_p = F_2 - F_1.$$

Средняя расчетная индукция потока рассеяния с наружной стороны полюса модели

$$B_p = \frac{F_p}{\delta}.$$

Коэффициент  $\kappa_p$  определяется по уравнению (3)

$$\kappa_p = \frac{B_p}{B_0}.$$

Аналогично определяется коэффициент  $\kappa_p^1$  для боковой поверхности полюса с внутренней стороны.

В результате измерений коэффициентов рассеяния на плоской модели и на действующих электромагнитах было найдено значение коэффициента  $\kappa_p$ , близкое к

$$\kappa_p = 0,56.$$

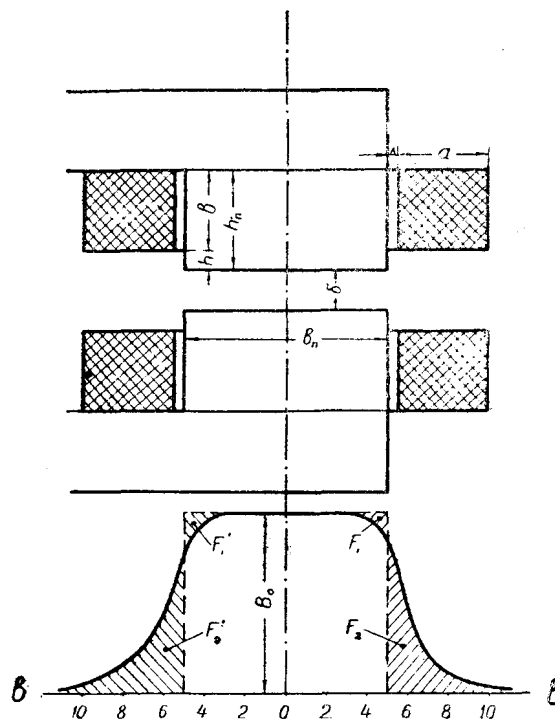


Рис. 3

Таким образом, при ориентировочном определении коэффициента рассеяния магнитного потока полюсов можно пользоваться следующими уравнениями.

1. Общий коэффициент рассеяния потока полюсов бетатрона

$$\sigma_n = 1 + 0,56 \frac{\delta_0}{r_0}.$$

2. Коэффициент рассеяния потока кольцевых управляющих полюсов бетатрона, учитывающих рассеяние только с наружной стороны,

$$\sigma_{yn} = 1 + 0,56 \frac{r_n \cdot \delta_0}{r_0 \cdot b_y}.$$

3. Коэффициент рассеяния потока кольцевых управляющих полюсов, учитывающий рассеяние с внешней и внутренней стороны, и коэффициент рассеяния потока полюсов в синхротроне

$$\sigma_y = 1 + 1,12 \frac{\delta_0}{b_y}.$$

4. Коэффициент рассеяния магнитного потока полюсов циклотрона

$$\sigma_n = 1 + 1,12 \frac{\delta}{r_n}.$$

Коэффициент  $k_p = 0,56$  был получен при катушках намагничивающей обмотки, расположенных на полюсных сердечниках.

В больших ускорителях с радиусом полюсов более 100 см значение коэффициентов  $\sigma_n$  и  $\sigma_y$  получается точнее, если в приведенные выше уравнения подставлять вместо  $\delta_0$  зазор между корректирующими зубцами  $\delta_k$ .

В некоторых, правда, очень редких случаях катушки намагничивающей обмотки могут быть расположены на стойках магнитопровода. Коэффициент рассеяния потока полюсов при таком расположении катушек будет больше, чем при катушках, расположенных на полюсах.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Филиппов М. Ф. К расчету радиуса равновесной орбиты бетатрона. Известия ТПИ, т. 87, 1957.